

VARIACIÓN DE LA DENSIDAD DE LA MADERA A LO LARGO DEL FUSTE EN EUCALYPTUS GLOBULUS. INFLUENCIA DE LOS INCENDIOS FORESTALES

Guillermo Riesco Muñoz

Departamento de Enxeñería Agroforestal, Universidade de Santiago de Compostela. Escuela
Politécnica Superior. Campus Universitario s/n. 27002 Lugo (España). guillermo.riesco@usc.es

RESUMEN

La magnitud del problema de los incendios forestales en Galicia hace que cada año se vean afectadas por el fuego numerosas plantaciones de eucaliptos. Los ejemplares que son afectados pero no destruidos, siguen teniendo interés comercial y son objeto de aprovechamiento maderero aunque la madera procedente de estos pies sufra una depreciación importante. En este trabajo se ha analizado el peso específico anhidro (densidad anhidra) de la madera y su variación a lo largo del fuste, comparando un grupo de 15 árboles sanos con otro grupo de 10 árboles afectados por el fuego, a fin de averiguar si la depreciación de la madera está justificada por una significativa pérdida de propiedades del material. Se encontró que la representación gráfica mediante nubes de puntos, donde estos no representan pares de valores de mediciones individuales sino promedios de mediciones, permitía explorar cuál es la altura del fuste a partir de la que empieza a haber diferencias apreciables entre la densidad anhidra de pies verdes y la de pies afectados por el fuego. Dicha exploración gráfica preliminar se contrastó con regresión percentilica (percentiles del 95 y 5 %), encontrándose para la muestra analizada que hasta los 11 m de altura en el fuste, correspondiente a un diámetro con corteza de unos 9 cm, no hay diferencias significativas de densidad (al 10 % de nivel de significación) entre la madera procedente de árboles sanos y la procedente de árboles afectados por el fuego.

Palabras y frases clave: propiedad física, análisis exploratorio, regresión percentilica.

1. INTRODUCCIÓN

Las masas forestales de la especie *Eucalyptus globulus* Labill. ocupan un total de 433.916 ha en Galicia, ya sea en masas puras o en mezcla con otras especies, considerando tanto las plantaciones como las masas procedentes de rebrote. Dicha superficie representa el 31 % de toda la superficie forestal arbolada de la comunidad, según las estadísticas oficiales más recientes, que son las procedentes del Cuarto Inventario Forestal Nacional (Dirección General de Medio Natural y Política Forestal, 2011). Por otra parte, la incidencia de los incendios forestales es tan elevada en Galicia que con frecuencia las masas arboladas sufren los daños del fuego, incluyendo a las formaciones de eucaliptos. De hecho, *Eucalyptus globulus* es una de las especies más afectadas por los incendios forestales, tanto a nivel nacional como en Galicia (Ministerio de Medio Ambiente, 2006).

Después de un incendio forestal se impone la rápida extracción de los productos maderables, tanto para evitar el peligro de plagas para masas forestales vecinas como para evitar el progresivo deterioro de la madera afectada y la consiguiente depreciación de la misma. Asimismo, la retirada de los troncos quemados facilita las labores posteriores de gestión forestal y obedece también, aunque en menor medida, a razones estéticas. Además, determinados árboles en zonas quemadas pueden parecer sanos pero su posible debilidad fisiológica les hace ser los primeros candidatos a ser atacados por plagas defoliadoras e insectos xilófagos, sobre todo si se dan condiciones climáticas desfavorables, por lo que la corta de árboles vivos puede estar justificada si se sospecha un daño por fuego en el interior del tronco. Por otro

lado, la permanencia de pies quemados supone una peligrosa carga de combustible en la zona, que incrementa la probabilidad y la severidad potencial de un incendio futuro (Bautista *et al.*, 2004).

Ante el paso de un incendio el árbol puede quedar intacto o bien afectado por el fuego, o incluso quemado, influyendo en ello tanto las características del árbol, por ejemplo el espesor de la corteza, como el “comportamiento del incendio”. Dicho comportamiento (calor desprendido por unidad de superficie, intensidad, longitud de llama, velocidad de propagación) se puede estimar mediante modelos implantados en sistemas informáticos. Entre estos sistemas destaca BehavePlus (Carlton *et al.*, 2001), basado en la ecuación de propagación de Rothermel (Rothermel, 1972; Andrews, Chase, 1989), que es el modelo de comportamiento del fuego de superficie de mayor prestigio y reconocimiento internacional.

Los eucaliptos sanos suelen ser transformados por la industria de la celulosa, para la fabricación de pasta al sulfato, mientras que los pies afectados por el fuego tienen el mismo destino industrial aunque sufren una depreciación. Cuando la calidad y dimensiones de las trozas de eucalipto lo permiten, la madera es transformada por industrias de aserrado y chapa, pero si la madera está afectada por el fuego es dirigida a la industria de desintegración, en las que la materia prima está menos cotizada. En uno u otro caso esta depreciación se atribuye en parte a una supuesta reducción en la calidad de la madera procedente de árboles dañados por el fuego, reducción que debería ser apreciable en aquellas propiedades físicas y mecánicas que comúnmente se utilizan como indicadores de calidad de esta materia prima.

En el presente trabajo se ha analizado el peso específico anhidro de la madera (densidad anhidra) y su variación a lo largo del fuste, comparando madera de árboles sanos y de árboles afectados por el fuego, a fin de averiguar si la depreciación de la madera está justificada por una significativa pérdida de propiedades del material.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Para la toma de muestras en las que basar la realización de este trabajo se apearon 15 ejemplares verdes y aparentemente sanos de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill.) así como 10 ejemplares de la misma especie afectados por el fuego y aparentemente secos. Con ello se superaba el tamaño de muestra mínimo de 5 árboles que establece la norma UNE-EN 384:2010 (AENOR, 2010). Los árboles de la muestra, cuyas principales características se indican en la tabla 1, se encontraban próximos a la edad de corta final que se suele aplicar a esta especie en Galicia (González-Río *et al.*, 1997) y procedían de seis masas forestales, localizadas en los siguientes municipios: Lorenzana y Ribeira de Piquín en Lugo, La Coruña y Mesía en la provincia de La Coruña, Catoira y Pontevedra en la provincia de Pontevedra. El diámetro normal de los árboles de la muestra se midió con forcípula de $\pm 0,5$ cm de precisión y la altura total con hipsómetro Blume-Leiss con precisión de $\pm 0,5$ m. La edad se determinó a partir de la fecha de plantación.

		mínimo	media	máximo
Pies verdes (<i>n</i> = 15)	Diámetro normal (cm)	11,3	14,6	17,3
	Altura total (m)	9,4	15,1	20,0
	Edad (años)	9	10,1	12
Pies dañados (<i>n</i> = 10)	Diámetro normal (cm)	10,5	13,0	16,3
	Altura total (m)	14,8	16,2	18,6
	Edad (años)	10	12,1	13

Tabla 1: Características dendrométricas de los ejemplares de *Eucalyptus globulus* de la muestra. *n* = número de pies de la muestra.

Para analizar las propiedades de la madera, de cada fuste apeado se extrajeron rodajas de la sección transversal completa a diferentes alturas en el tronco: en la base, a 1 m de altura, a 2 m de altura, etc. hasta obtener en algunos ejemplares rodajas a 11 m de altura, lo que representaba el 67 % de la altura total del fuste. Se pretendía obtener rodajas tan arriba como fuera posible en el fuste, para hacer así más apreciable la previsible tendencia de la variable densidad a lo largo del tronco. No obstante, no fue posible obtener rodajas a alturas superiores a 11 m ya que su pequeño diámetro imposibilitaba la extracción posterior de las probetas de ensayo normalizadas que se requieren para la medida de la densidad.

Las rodajas se cortaron con un espesor aproximado de 10 cm y seguidamente se labraron en carpintería para obtener de ellas probetas prismáticas de pequeñas dimensiones (dimensiones nominales: 2 cm de dimensión radial, 2 cm de dimensión tangencial y 4 cm de dimensión longitudinal) y libres de defectos, que fueron desecadas hasta estado anhidro en una estufa a 103 °C durante una semana. Tras el secado, y enfriado posterior de las probetas en un ambiente desecante, se determinó para cada pieza su peso con precisión de centésima de gramo y sus tres dimensiones principales (dimensión radial, tangencial y longitudinal), con precisión de centésima de milímetro. Se consideró que cada probeta era un prisma perfecto por lo que el volumen de cada pieza se obtuvo como producto de sus tres dimensiones principales. El peso específico anhidro se obtuvo por cociente entre el peso medido en estado anhidro y el volumen calculado para la probeta, también en estado anhidro, expresado en kilogramos por metro cúbico. En promedio se obtuvieron unas 11 probetas válidas por rodaja y en total fueron válidamente ensayadas 2.145 probetas, magnitud de muestra que superan ampliamente los mínimos establecidos en la norma UNE 56528:1978 (AENOR, 1978).

El análisis sobre probetas de pequeñas dimensiones sin defectos permite caracterizar la madera de una especie y comparar madera de diversas procedencias ya que la presencia de defectos o singularidades en la madera es una fuente de variación que impediría detectar la influencia de otros factores en las propiedades del material.

Para la representación gráfica de pares de valores se empleó la hoja de cálculo Microsoft Excel 2010. Para la obtención de histogramas y estadísticos descriptivos de las variables se empleó el programa estadístico IBM SPSS Statistics versión 20. Para la obtención de la regresión percentflica se empleó el programa estadístico R (Koenker, 2015; R Core Team, 2014).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La distribución de los valores y los principales estadísticos descriptivos de la muestra de peso específico anhidro se pueden encontrar en la Figura 1 y en la Tabla 2, que se obtuvieron tras validar y depurar los resultados de los ensayos. La dispersión de resultados es similar a la que indica la norma UNE 56528:1978 (AENOR, 1978) para las propiedades gravimétricas obtenidas sobre probetas de pequeñas dimensiones sin defectos. Tanto la Figura 1 como la Tabla 2 no muestran una distinción clara entre los grupos madera verde/madera dañada para la variable peso específico anhidro.

variable	<i>n</i>	mínimo	media	máximo	CV (%)
ρ_0 (verde)	1.454	334	624	1.042	14
ρ_0 (afectado)	691	489	616	939	10
ρ_0 (total)	2.145	334	621	1.042	13

Tabla 2: Características de la muestra de datos de peso específico anhidro. *n* = tamaño de muestra; CV (%) = coeficiente de variación (relación entre la media y la desviación típica en porcentaje); ρ_0 = peso específico anhidro (kg/m³).

Por otra parte, en la representación de la nube de puntos correspondiente a los pares de valores peso específico anhidro de la probeta frente a altura de la probeta en el fuste (Figura 2) no son claramente distinguibles tendencias diferentes en los dos grupos de probetas (madera verde/madera dañada). Debido a ello se combinaron ambos grupos de probetas en uno solo, para el que se obtuvo el coeficiente de correlación lineal de Pearson entre peso específico anhidro y altura en el fuste, que resultó ser $R = 0,13$, valor muy pobre aunque altamente significativo ($p < 0,01$) debido probablemente al elevado número de pares de valores en el que se basa el cálculo. Debido al amplio rango de variación de alturas totales en la muestra (Tabla 1) se probó a utilizar la altura relativa en el fuste (altura en el fuste dividida por la altura del árbol muestreado, expresada en porcentaje) en lugar de la altura absoluta en metros. Sin embargo, en este caso el valor del coeficiente de correlación era aún más bajo ($R = 0,11$; $p < 0,01$). La correlación lineal se muestra por tanto insuficiente para la nube de puntos de la Figura 2 ya que se trata de una colección de puntos con una pendiente inapreciable, salvo en el primer metro de altura de fuste, en el que se da una gran reducción de densidad para después estabilizarse. Además, la distribución no sigue un patrón lineal y existe una elevada dispersión de valores de peso específico para cada altura de fuste

(coeficiente de variación promedio del 8 %). Debido a ello se renunció a modelizar la nube de puntos de la Figura 2, ni para la muestra en su conjunto ni para cada grupo de probetas por separado.

Para encontrar una representación gráfica en la que fueran más claramente observables las tendencias entre pares de variables se procedió a representar el valor medio del peso específico anhidro para cada altura de fuste en cada árbol (valor medio del peso específico por rodaja), resultando la representación de la Figura 3. Debido a que esta nueva representación tampoco revelaba tendencias divergentes entre grupos de probetas se representó en la figura 4 la media del peso específico anhidro para todas las probetas de todos los árboles para cada altura. En este caso de máxima simplificación (un valor para cada altura de fuste en cada grupo de datos) sí se aprecia una tendencia a una menor densidad en la madera de pies afectados por el fuego a partir de los seis metros de altura en el fuste. Para contrastar la significación estadística de esta diferencia de tendencias entre los dos grupos de probetas se procedió a efectuar una regresión percentilica, que consistió en obtener por regresión ponderada la curva del percentil del 95 % y la del percentil del 5 % para cada nube de puntos (probetas procedentes de árboles sanos/probetas procedentes de árboles afectados). Para ello se ajustó para cada conjunto de puntos un polinomio completo de orden 3 por el método de ajuste de mínimos cuadrados ordinarios, siendo las curvas percentilicas ecuaciones de la misma naturaleza ($y = a + bx + cx^2 + dx^3$). Las curvas obtenidas aparecen de forma analítica y de forma gráfica en la Tabla 3 y en la Figura 5 respectivamente. Se observa (Tabla 3) que en la curva del percentil 5 % para madera de pies afectados por el fuego los parámetros b , c y d no son significativamente distintos de cero por lo que debería recalcularse la ecuación, si bien se desiste de esta posibilidad dado que dicha curva no afecta a la distinción entre poblaciones de madera sana/madera afectada, que es el objetivo buscado, y que depende de la curva del percentil superior.

		parámetro	valor	error típico	t	Sig.
Madera de pies verdes	Curva del percentil 95 %	d	-1,61405	0,16636	-9,70199	0,00000
		c	29,17649	2,80919	10,38609	0,00000
		b	-140,20758	13,53972	-10,35528	0,00000
		a	911,99805	20,15138	45,25734	0,00000
	Curva del percentil 5 %	d	-0,24838	0,13170	-1,88598	0,05950
		c	4,25780	1,93130	2,20463	0,02764
		b	-4,53782	7,89531	-0,57475	0,56555
		a	465,14699	10,43775	44,56392	0,00000
Madera de pies afectados por el fuego	Curva del percentil 95 %	d	-0,65047	0,21918	-2,96770	0,00310
		c	13,74701	4,04367	3,39963	0,00071
		b	-90,87358	23,09181	-3,93532	0,00009
		a	874,21282	42,59010	20,52620	0,00000
	Curva del percentil 5 %	d	-0,22333	0,20431	-1,09308	0,27474
		c	2,87355	3,37990	0,85019	0,39552
		b	-5,39073	15,76452	-0,34195	0,73249
		a	517,46147	19,94507	25,94433	0,00000

Tabla 3: Características de las curvas percentilicas. a , b , c y d = parámetros del modelo; t = t de Student; Sig. = nivel de significación.

En la figura 5 se observa que, en el rango de alturas de fuste analizado, la curva ajustada para el percentil 5 % de madera procedente de árboles sanos nunca toma valores superiores a la curva del percentil 95 % de madera procedente de pies dañados. Por tanto, el resultado que apuntaba la figura 4 hacia una posible diferenciación de tendencias en relación al peso específico anhidro frente a la altura en el fuste no es estadísticamente aceptable al 10 % de nivel de significación para ningún intervalo de alturas del fuste en el rango de alturas analizado. De este modo, hasta los 11 m de altura en el tronco (equivalente en la muestra a un diámetro de fuste de unos 8,7 cm) la madera procedente de eucaliptos sanos y la madera procedente de eucaliptos afectados por el fuego no presentan diferencias significativas de densidad, por lo que la depreciación que sufre el eucalipto a causa de verse afectado por el fuego no es justificable atendiendo a cambios de densidad de la materia prima.

Extrapolando las curvas obtenidas en la figura 5 para alturas de fuste superiores a los 11 m podría predecirse una diferenciación significativa entre densidades por la acción del fuego (pérdida de densidad

de la madera dañada), si bien el volumen de madera que se vería afectado sería irrelevante dado el escaso diámetro de los fustes a alturas próximas al ápice.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor don Juan Gabriel Álvarez González, por su colaboración en el análisis estadístico de los resultados experimentales.

REFERENCIAS

AENOR (1978) UNE 56528:1978. Características físico-mecánicas de la madera. Preparación de probetas para ensayos. AENOR.

AENOR (2010) UNE-EN 384:2010. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. AENOR.

Andrews, P. L., Chase, C. H. (1989) BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System-BURN Subsystem, Part 2. USDA Forest Service. National Wildfire Coordinating Group. Gen. Tech. Rep. INT-260.

Bautista, S., Gimeno, T., Mayor, A. G., Gallego, D. (2004) El tratamiento de la madera quemada tras los incendios forestales. En: Avances en el estudio de la gestión del monte mediterráneo. (Vallejo, R. y Alloza, J. A., eds.). Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo.

Carlton, D., Andrews, P. L., Bevins, C. (2001) Users' Guide BehavePlus Fire Modeling System Version 1.00.00. USDA Forest Service. Rocky Mountain Research Station. Systems for Environmental Management.

Rothermel, R. C. (1972) A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station. Res. Pap. INT-115.

Dirección General de Medio Natural y Política Forestal (2011) Cuarto Inventario Forestal Nacional. Galicia.

González-Río, F., Castellanos, A., Fernández, O., Astorga, R. y Gómez, C. (1997) Manual de selvicultura del eucalipto. Escola Politécnica Superior de Lugo, Celulosas de Asturias S.A.

Koenker, R. (2015) quantreg: Quantile Regression. R package version 5.11. <http://CRAN.R-project.org/package=quantreg>

Ministerio de Medio Ambiente (2006) <http://www.marm.es/>

R Core Team (2014) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.

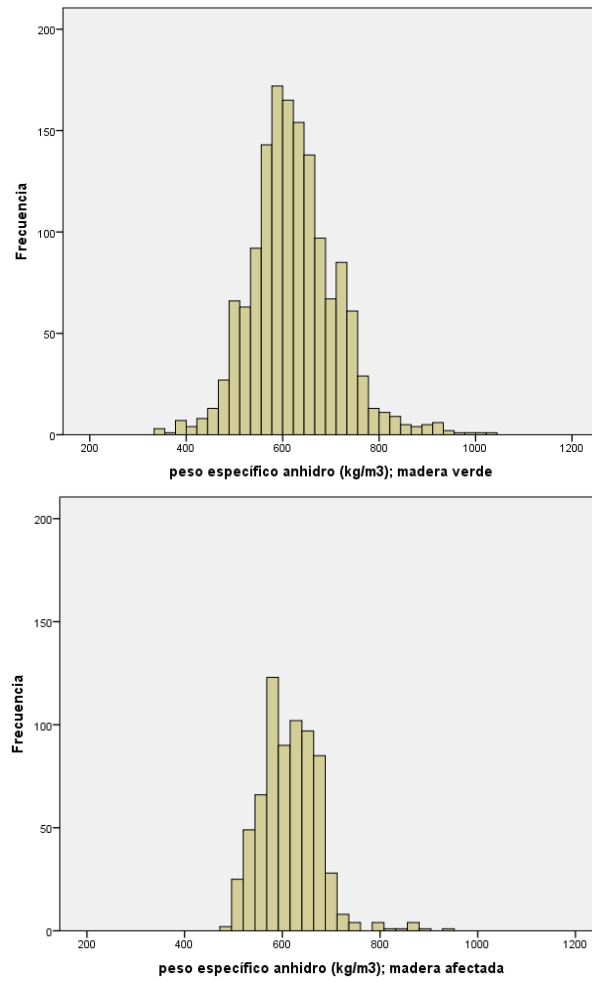


Figura 1: Distribución de la variable peso específico anhidro.

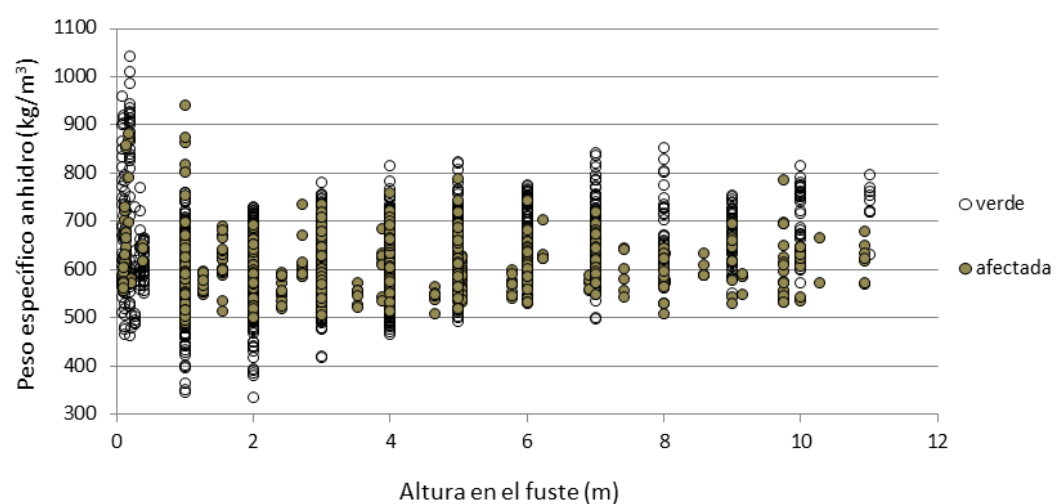


Figura 2: Variación del peso específico anhidro a lo largo del fuste. Cada punto representa una probeta ensayada.

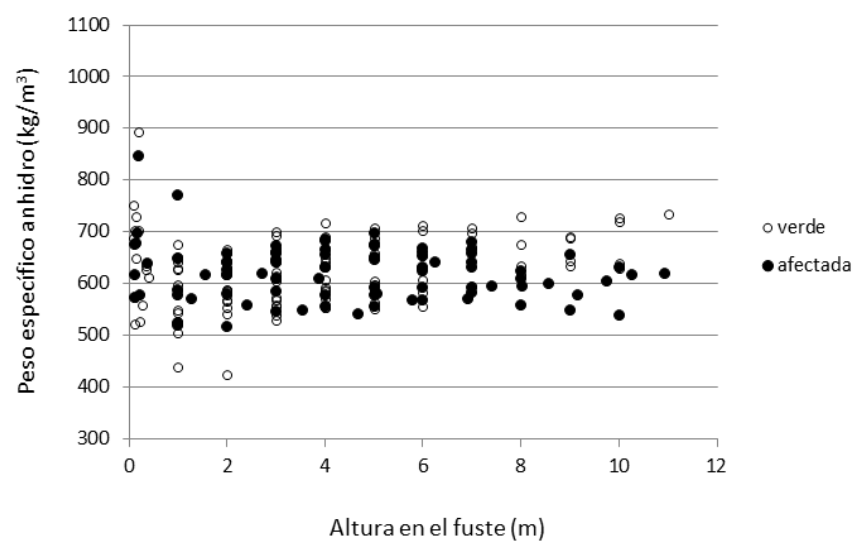


Figura 3: Variación del peso específico anhidro a lo largo del fuste. Cada punto representa la media del peso específico anhidro de todas las probetas ensayadas en una rodaja (probetas procedentes de cierta altura en un árbol determinado).

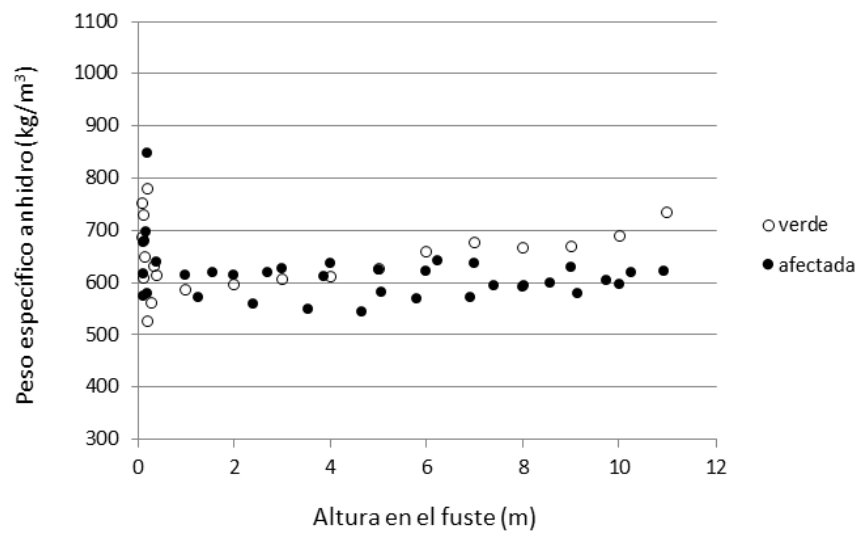


Figura 4: Variación del peso específico anhidro a lo largo del fuste. Cada punto representa la media del peso específico anhidro de todas las probetas de todos los árboles para cierta altura en el fuste.

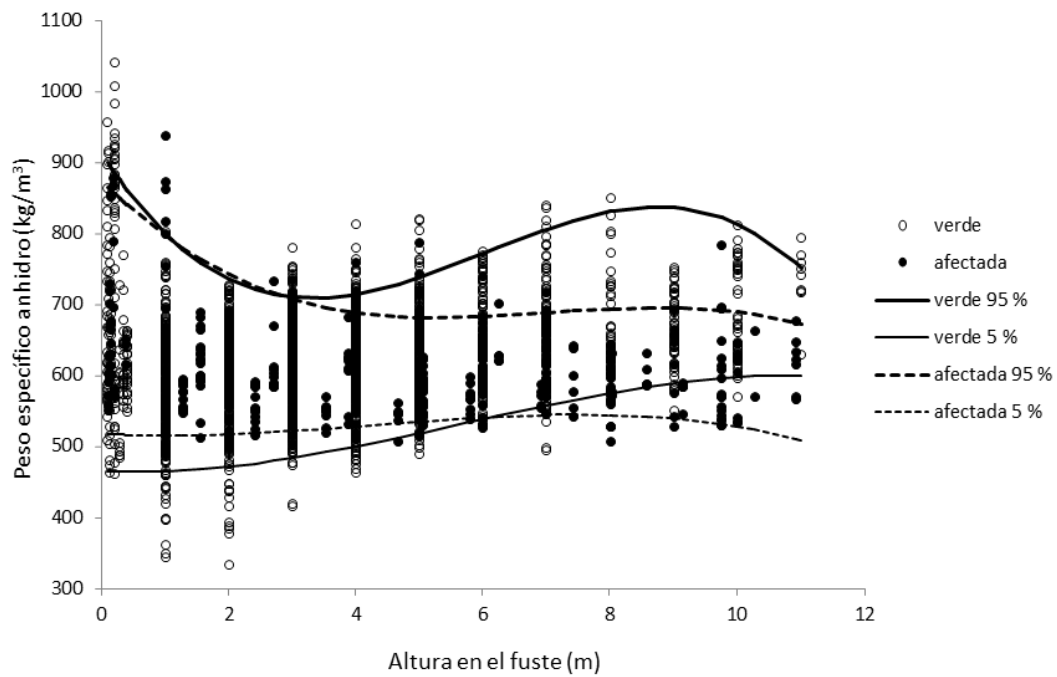


Figura 5: Variación del peso específico anhidro a lo largo del fuste. Cada punto representa una probeta ensayada. Las líneas de trazo continuo representan las curvas de ajuste del percentil 95 % y 5 % para las probetas procedentes de árboles sanos. Las líneas de trazo discontinuo representan las curvas de ajuste del percentil 95 % y 5 % para las probetas procedentes de árboles afectados por el fuego.